ÜBER DAS VERHÄLTNIS

DER

ENERGIE DER RÖNTGENSTRAHLEN ZUR ENERGIE DER ERZEUGENDEN KATHODENSTRAHLEN.

INAUGURAL-DISSERTATION

VERFASST UND DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT

DER

KGL. BAYER. JULIUS-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT WÜRZBURG

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

VORGELEGT AM 16. JULI 1906

VON

EDNA CARTER

AUS

OSHKOSH, WISCONSIN, U. S. A.

WÜRZBURG.

DRUCK DER KGL. UNIVERSITÄTSDRUCKEREI VON H. STÜRTZ.

1906.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41507204_0002

Meiner lieben Freundin

Frau Marcella Boveri.

Nachstehende Arbeit habe ich auf Veranlassung des Herrn Professor Dr. W. Wien unternommen und während der letzten drei Semester im Physikalischen Institut der Universität Würzburg ausgeführt.

Es sei mir gestattet, meinem hochverehrten Lehrer Herrn Professor Dr. Wien für die Anregung zu der Arbeit und für die gütige Hilfe, die er mir bei derselben in freundlichster Weise gewährte, meinen wärmsten Dank auszusprechen.

Auch an dieser Stelle möchte ich den Herren Privatdozenten Dr. Seitz und Dr. Harms für ihre freundliche Unterstützung danken.

Über das Verhältnis der Energie der Röntgenstrahlen zur Energie der erzeugenden Kathodenstrahlen.

Messungen der Energie der Röntgenstrahlen mittelst ihrer Wärmewirkung sind von Dorn[1]), Schöps[2]), Rutherford[3]), Wien[4]) und Angerer[5]) ausgeführt worden. Dorn benutzte eine Töplersche Drucklibelle, mit welcher er zwei symmetrische Glasröhren verband. In der einen Röhre wurden die Strahlen von Metallblechen absorbiert und die entwickelte Wärmemenge verursachte einen Ausschlag an der Libelle. Den anderen dagegen dienten Bolometer, die im wesentlichen nach Art der Lummer-Kurlbaumschen[6]) Flächenbolometer konstruiert wurden.

Eine zweite Methode, die für relative Messungen sich bewährt hat, rührt von Versuchen von P. Curie und G. Sagnac[7]) her. Wenn Röntgenstrahlen auf ein Metallblech fallen, so werden Sekundärstrahlen erzeugt, die aus negativ geladenen Teilchen bestehen. Der grösste Teil dieser Sekundärstrahlen wird im Blech wieder absorbiert, einige jedoch gelangen heraus und die Metallplatte wird dadurch positiv geladen. Man kann die so erzeugte

---

1) Dorn, E., Wied. Ann. 63. p. 160. 1897.

2) Schöps, K., Zeitschr. f. Naturw. 72. p. 145. 1899.

3) Rutherford, E. und Mc. Klung, R. K., Proc. Roy Soc. 67. p. 245. 1900. Physik. Zeitschr. 2. p. 53. 1900.

4) Wien, W., Ann. d. Physik. 18. p. 991. 1905.

5) Angerer, E., Inaug.-Dissert. München. 1905.

6) Lummer, O. u. Kurlbaum, J., Wied. Ann. 46, 1892; 51, 1894; 61, 1897.

7) Curie, P. u. Sagnac, G., Compt. rend. 130. I. p. 1013. 1900.

Elektrizitätsmenge mit einem Elektrometer messen und als Mass für die Röntgenstrahlenenergie betrachten. Bei solchen Messungen ist es notwendig, dass die Metallplatte sich in einem möglichst hoch evakuierten Raum befindet und dass die Zuleitungen zum Elektrometer, sowohl wie das Elektrometer selbst, gegen die ionisierte Luft geschützt werden. Diese Methode wurde von Holtsmark, Wien und Angerer angewendet.

Moffat[1]) versuchte, den absoluten Wert für die Röntgenstrahlenenergie durch Vergleichung der Fluoreszenzwirkung mit der Strahlung einer Normallichtquelle zu bestimmen.

Folgendes sind die Werte, welche von den verschiedenen Forschern für die Gesamtenergie der Röntgenstrahlen pro Sekunde angegeben werden.

Dorn	harte Strahlen	5 Unterbrechungen	1,51	mg	cal.
„	sehr „	„	9	„	1,68	„	„
Schöps	weiche	„	5—7	„	0,77—1,38	„	„
Rutherford			57	„	11	„	„
Wien	harte	„	32	„	1,5	„	„
Moffat	weiche	„	90	„	18	„	„
Angerer			107	„	32	„	„

Dass die Reduktion auf eine Unterbrechung keine Bedeutung hat, wird aus meinen Versuchen hervorgehen. Die Resultate zeigen, dass jedenfalls nur ein sehr kleiner Teil der Kathodenstrahlenenergie in Röntgenstrahlen verwandelt wird. Eine genaue Übereinstimmung ist nicht zu erwarten, weil in allen Fällen, ausser in den Wienschen Untersuchungen, Messungen gewisser Eigenschaften, welche die Energie der Röntgenstrahlen beeinflussen, fehlen. Sie ist in erster Linie von der Kathodenstrahlenenergie und dadurch von dem Primärstrom abhängig und dieser konnte sehr verschieden gewesen sein. Doch kann man den Primärstrom nicht beliebig wählen, und nach meinen Versuchen ist mir der grosse Wert von Angerer auf diesem Wege nicht erklärlich. Die Fluoreszenz-Methode von Moffat kann nicht als genau betrachtet werden.

---

[1]) Moffat, A., Edinb. Proc. 21. p. 430. 1898. Sitzungsber. d. Phys.-med. Soz. Erlangen. 30. p. 70. 1898.

Wien hat in seiner Arbeit gezeigt, wie das Verhältnis der Energie der Röntgenstrahlen zu der der erzeugenden Kathodenstrahlen $\frac{E_r}{E_k}$ benutzt werden kann, um die Impulselänge λ zu berechnen, und unter der Voraussetzung, dass die Elektronen ihre Gestalt bei der Bewegung nicht ändern, hat er folgende Formel abgeleitet:

$$\lambda = \frac{E_k}{E_r} \cdot \frac{1}{V} \frac{v_o^2 \, e}{12 \, c^2} \left| \frac{2 + 3 \, k_o^2}{k_o^4} + \frac{3}{2} \frac{c}{v_o} \log \frac{1 + \frac{v_o}{c}}{1 - \frac{v_o}{c}} \right|$$

V = die Spannung an der Röhre,

v_o = die Geschwindigkeit der Kathodenstrahlenelektronen, die sich aus dem Werte für v berechnen lässt,

e = die Ladung eines Elektrons = 3,4 . 10^{-10} elektrostatische Einheiten,

c = die Lichtgeschwindigkeit;

$$k_o^2 = 1 - \frac{v_o^2}{c^2}.$$

Für $\frac{E_k}{E_r}$ bei einer Spannung von 58700 Volt hat er, unter der Voraussetzung, dass ebensoviel Energie in die Antikathode hineingeht wie herauskommt, den Wert 459 bekommen.

Daraus berechnete er:

$$\lambda = 1{,}15 \, . \, 10^{-10}.$$

Es schien von Wichtigkeit, danach zu wissen, wie diese Beziehung $\frac{E_r}{E_k}$ sich bei verschiedenen Anordnungen und verschiedenen Spannungen verhält. In der vorliegenden Arbeit untersuchte ich die Abhängigkeit von

1. der Primärstromstärke,
2. der Spannung an der Röhre,
3. der Unterbrechungszahl,
4. der Unterbrechungsart und
5. dem Metall, das die Antikathode bildet.

Gewisse Unsicherheiten treten in diesen Versuchen hervor, welche nicht ganz zu umgehen sind. Erstens gibt es keine feste

Definition für die Röntgenstrahlenenergie und es fragt sich, ob man die Wärmewirkung als Mass dafür annehmen darf. Wien hat die Vermutung ausgesprochen, dass die Absorption der Röntgenstrahlen nur dadurch erfolgt, dass die absorbierbaren Sekundärstrahlen erzeugt werden. Er hat auch bewiesen, dass die grosse Geschwindigkeit der Sekundärstrahlen sich nicht durch direkte Beschleunigung der freien Elektronen durch die Röntgenwelle erklären lässt.

Die Entstehung der Sekundärstrahlen muss dann ein Radioaktivitätsvorgang sein, und ihre Energie zum Teil wenigstens aus den Atomen stammen. Ob die äquivalente Energiemenge von den Atomen aufgenommen werde, war die nächste Frage.

Es ist aber sehr wahrscheinlich, dass die Abgabe von negativen Elektronen aus den Atomen, ein Vorgang, der bei den radioaktiven Substanzen von selbst vor sich geht, bei anderen Substanzen mit sehr verschiedener Leichtigkeit geschehen würde. In diesem Falle würde die Energie der Sekundärstrahlen und damit die erzeugte Wärme bei verschiedenen Metallen verschieden sein.

Bumstead[1]) hat die Wärmewirkung der Röntgenstrahlen auf Blei und Zink mit einem sorgfältig zu diesem Zwecke konstruierten Radiometer verglichen. Die Flügel bestanden aus Aluminium und die bestrahlten Metallplatten bildeten Fenster in der Radiometerwand. Er glaubte konstatiert zu haben, dass, obgleich die Absorption in beiden Platten gleich war, die entwickelte Wärmemenge im Blei zweimal so gross wie im Zink war. Die Versuche werden von ihm fortgesetzt werden. Wenn dieses Resultat sich vollständig bestätigen lässt, dann ist bewiesen, dass die erzeugte Wärmemenge nicht ein direktes Mass für die Röntgenstrahlenenergie ist, und die letztere wird eine schwer messbare Grösse sein.

Zweitens ist es noch nicht bekannt, was für eine Rolle die reflektierten Kathodenstrahlen, welche an der Erwärmung der Antikathode etwas teilnehmen, bei der Erzeugung von Röntgenstrahlen spielen. Es ist möglich, dass jedes Elektron bei der Re-

---

[1]) Bumstead, H. A., Am. Journ. Sei. Jourth Series XXI. Nr. 121. 1906. Phil. Mag.

flexion zwei oder mehrere Röntgenimpulse aussendet, je nach der Anzahl der Stösse.

Drittens kann die selektive Absorption in der Röhrenwand nicht genau berücksichtigt werden. Die Strahlen, wie sie die Antikathode verlassen, sind sehr inhomogen. Fast alle, welche einer Spannung von weniger als 14000 Volt entsprechen, werden nach meinen Versuchen in der Röhrenwand absorbiert. Die gemessene Absorption in einer zweiten Glaswand ist dann ein viel kleinerer Prozentsatz. Das Hineinbringen des Messapparates in die Röhre selbst ist mit vielen Schwierigkeiten verknüpft.

Beschreibung der Apparate.

Bei allen Versuchen war eine Röhre nötig, in welcher die von den Kathodenstrahlen auf der Antikathode erzeugte Wärmemenge gemessen werden konnte. Die Antikathode bildete danach den Boden eines in die Röntgenröhre eingesetzten Glasrohres, das als Kalorimetergefäss diente. Die Temperaturerhöhung eines bestimmten Quantums Wasser wurde mit einem Thermometer gemessen.

Zur Eichung dieser Messungen wurde eine Drahtspule eingesenkt, durch welche ein Strom floss, der dieselbe Temperaturerhöhung hervorbrachte und dessen Wattverbrauch bestimmt werden konnte. Die Energie der auffallenden Kathodenstrahlen wurde dadurch in Grammkalorien ausgedrückt.

Die erste Röhre war von Müller in Hamburg und war dieselbe, die Wien in seinen Untersuchungen benützt hatte. Die Vorrichtung zur Regulierung des Vakuums reichte nicht aus für Spannungen unter 45 Kilovolt. Diese Röhre sowohl, wie alle späteren, wurde dann in Verbindung mit einer Quecksilberpumpe, deren Kugel ziemlich klein war, gesetzt. Luft konnte hineingelassen werden durch eine sehr feine Kapillare von etwa ein Meter Länge. Um die Elektroden vor Quecksilberdampf zu schützen, wurde eine erweiterte mit Schwefelkörnchen gefüllte Röhre dazwischen geschaltet. Kupferspiralen befanden sich in der Leitung auf beiden Seiten des Schwefels, welche dazu dienten, den Schwefeldampf einerseits von der Pumpe, andererseits von der Röhre abzuhalten.

Zur Erzeugung der Strahlen diente meistens ein grosses Induktorium mit einer Schlagweite von 40 cm und ein Quecksilber-Turbinenunterbrecher, der den Strom etwa 32 mal in der Sekunde unterbrach. Die Unterbrechungszahl konnte mit Übersetzungen und mit verschiedenen Segmentringen in dem Unterbrecher selbst fast beliebig geändert werden. Ein anderes Induktorium, in welchem die vier Primärspulen beliebig parallel oder hintereinander geschaltet werden konnten, und ein Wehnelt- sowohl, wie ein Hammerunterbrecher waren zur Verfügung. Die Messungen wurden auch zum grössten Teil mit einer zwanzigplattigen Influenzmaschine kontrolliert.

Die Spannung an der Röhre wurde durch eine parallel geschaltete Funkenstrecke zwischen zwei Messingkugeln von 6 cm Durchmesser gemessen.

Bei der Ausführung der Versuche lag die grösste Fehlerquelle in der Spannungsmessung, erstens weil es meistens unmöglich war, die Spannung während der für einen Versuch nötigen zwei Minuten konstant zu halten und zweitens, weil es manchmal vorgekommen ist, dass Schwingungen irgendwie in diesen Kreis eingetreten sind, so dass Funken über einen viel grösseren Abstand hinübersprangen, als den, welcher der Spannung an der Röhre entsprach. In diesen Fällen war es nicht leicht, gerade den Abstand zu beurteilen, bei welchem die Funkenstrecke die Entladung von der Röhre wegnahm und ein Fehler von 15 % konnte leicht eintreten. Durch die grosse Anzahl von Beobachtungen habe ich versucht, diese Fehler so gut wie möglich zu überwinden. Die Funkenstrecke wurde mit einem Bleischirm vor den Strahlen geschützt.

Das Bolometer bestand aus 5 mm breitem und 0,03 mm dickem mit Russ bedecktem Platinblech, das in vier sehr nahe gleiche Widerstände verteilt wurde, um die Zweige einer Wheatstoneschen Brücke zu bilden. Jeder hatte etwa 2,5 Ohm. Die zwei bestrahlten Zweige waren auf einem Hartgummirahmen so angeordnet, dass die Streifen des vorderen die Spalten des hinteren Widerstandes bedeckten. Die anderen befanden sich hinter einem dicken Brett, auf welchem das ganze montiert wurde, und hinter einer dicken Bleiplatte. Mit einem der unbestrahlten Zweige, der einen klein

wenig grösseren Widerstand besass, wurde ein Widerstandskasten parallel geschaltet, mit dem durch Einschaltung von 200—2000 Ohm der Nullpunkt der Galvanometernadel reguliert werden konnte. Das Bolometer wurde in einem Zinkblechkasten mit Aluminiumfenster eingeschlossen und sehr sorgfältig durch Watte gegen Luftströmungen geschützt. Vor dem bestrahlten Teil befanden sich, um die Wärmestrahlung von der Röhre abzuhalten, drei Schichten Papier und zwei Aluminiumfolien. Es ist mir nicht gelungen, die Wärmewirkung von der Röhre ganz zu vermeiden, aber da die Röntgenstrahlen momentan auf das Bolometer wirkten und die Wärmestrahlung erst nach 40 Sekunden, so war die Störung, ausser bei sehr niedriger Spannung, sehr klein.

Das Galvanometer war ein Siemenssches astatisches Glockengalvanometer, dessen Widerstand 5,9 Ohm betrug und dessen Empfindlichkeit beständig bei einer Entfernung des Fernrohrs von $2^1/_2$ m auf $3 . 10^{-9}$ geblieben ist. Es wäre möglich, die Empfindlichkeit bis auf 10^{-10} zu steigern, aber dann ist es viel unruhiger. Die Beobachtungen wurden gewöhnlich gegen Abend gemacht, als die Temperatur im Zimmer sich vollständig ausgeglichen hatte und es nur wenig andere Störungen gab. Das Galvanometer hat dann seinen Nullpunkt sehr konstant behalten und gut messbare Ausschläge gegeben. Das Induktorium befand sich in einer Entfernung von 7 m von dem Galvanometer und konnte durch Drehung so gestellt werden, dass es keinen Einfluss auf die Galvanometernadel ausübte.

Während der Beobachtungen wurde der Strom von einem Akkumulator mit 10 Ohm Vorschaltwiderstand dauernd durch das Bolometer geschickt. Der Nullpunkt wurde durch den oben erwähnten mit einem Zweige parallel geschalteten Widerstand hergestellt. Die Zeit der Bestrahlung wurde durch Wegziehen eines Bleischirmes reguliert und betrug 15 Sekunden, gleich der Schwingungsdauer der Magnetnadel.

Bei jedem Versuch wurde zunächst die Temperatur im Kalorimetergefäss beobachtet; dann wurde die Röhre in Gang gesetzt und die Spannung mit der parallel geschalteten Funkenstrecke gemessen. Die Ruhelage des Galvanometers vor der Bestrahlung,

der Ausschlag und die Ruhelage nach der Bestrahlung wurden beobachtet. Dieses geschah oft zwei- oder dreimal hintereinander. Dann wurde die Funkenlänge wieder gemessen, der Strom ausgeschaltet und die Schlusstemperatur abgelesen.

Sekundär-Röhre.

Das 10 cm lange und 2 cm breite Platinblech, auf welchem die Sekundärstrahlen erzeugt wurden, befand sich in einer Glasröhre, die mit Erhitzung auf so hohes Vakuum ausgepumpt wurde, dass eine Entladung nicht mehr hindurchging. Sie wurde auf demselben Brett mit dem Bolometer hinter dem Aluminiumfenster befestigt. Die Zuleitung wurde durch ein dickes Bleirohr mit Schellack-Isolation geführt.

Das Elektrometer war ein Dolezaleksches mit einer Quarzaufhängung. Die Nadel wurde mit einer Zambonischen Säule oder einer 100 Volt-Batterie geladen. Das eine Quadrantenpaar wurde zur Erde abgeleitet, das andere mit der Sekundärplatte und mit einem grossen Kondensator von 10^4 cm Kapazität verbunden. Ein kleiner Kondensator von 41,5 cm Kapazität wurde auch in Verbindung gesetzt, um die Empfindlichkeit durch die Harmssche Methode[1]) zu kontrollieren. Ein Skalenteil entsprach $3—4 . 10^{-4}$ elektrostatischen Einheiten. Wenn die Zambonische Säule gebraucht wurde, war es nötig, die Empfindlichkeit bei jeder Versuchsreihe zu bestimmen.

Die Versuche wurden wie bei dem Bolometer ausgeführt und dauerten gewöhnlich 2—3 Minuten. Die Stelle der Nadel wurde alle 15 Sekunden abgelesen, um die Änderung in der Spannung an der Röhre während dieser Zeit zu kontrollieren. Wegen der grossen mit dem Elektrometer verbundenen Kapazität waren die Ausschläge der Elektrizitätsmenge proportional, welche von der Sekundärplatte in das Elektrometer pro Zeiteinheit hineinfloss.

[1]) Harms, F., Physikal. Zeitschr. 5. p. 47—50. 1904.

Die Abhängigkeit von der Spannung.

Die Abhängigkeit von der Spannung habe ich mit dem Bolometer und mit der Sekundärröhre untersucht. Mittelst einer Kurve, welche aus den Werten von Heydweiler für kleine und von Voigt[1]) für höhere Spannungen gezeichnet wurde, habe ich mir die Funkenlängen in Kilowatt übertragen. Unter 15000 Volt war ein Ausschlag am Elektrometer mit der benutzten Empfindlichkeit nicht zu merken und unter 45000 Volt waren die Ausschläge am Galvanometer nicht gut messbar, da die grössere Erwärmung in der Röhre bei kleiner Spannung dauernde Störungen des Nullpunktes verursachte, welche die Ausschläge überdeckten.

Die Resultate sind in folgenden Tabellen (I und II) angegeben und die Beziehung zwischen $\frac{E_r}{E_k}$ und der Spannkraft durch Kurven (I und II) dargestellt.

V sei die Spannung an der Röhre in Kilovolt.

E_k die Kathodenstrahlenenergie in g cal. pro Sekunde.

D der Ausschlag am Galvanometer.

e_s die auf der Sekundärplatte erzeugte Elektrizitätsmenge pro Sekunde in elektrostat. Einheiten.

---

[1]) Voigt, E., Ann. d. Physik 12. p. 385. 1903.

Tabelle I.

Kurve I. Bolometer. Abstand = 18 cm.

V Kilovolt	E_k	D	$\frac{D}{E_k}$	Bemerkungen
45	5,1	34	6,7	Primärstrom
53	5,1	49	9,6	4,9 Ampère
55	4,9	55	11,2	
59	4,7	63	13,4	
63	4,4	68	15,4	
67	4,1	72	17,5	
68	3,9	73	18,8	
44	5,5	36	6,5	
48	5,4	44	8,2	
54	4,8	53	11,0	
67	4,0	73	18,3	
70	3,5	72	20,5	
79	3,1	71	22,8	
45	5,8	32	5,5	
51	5,2	48	9,2	
57	5,0	60	12,0	
59	4,8	62	12,9	
71	3,2	91	28,4	Wahrscheinlich Fehler in der
78	2,3	75	32,5	Spannungsmessung
59	4,7	63	13,4	
64	4,3	74	17,2	
69	3,7	80	21,7	
87	3,2	79	24,7	
92	2,9	76	26,2	„ „
100	2,9	68—84	26,2	
48	2,5	14	5,6	Primärstrom
51	2,4	20	8,3	3,3 Ampère
52	2,3	22	9,6	
58	2,2	28	12,8	
64	1,9	30	15,8	
65	1,8	29	16,0	
39	10,3	57	5,5	Primärstrom
49	8,0	85	10,6	6,5 Ampère
59	9,2	115	12,5	
63	8,6	130	15,2	
69	7,4	145	19,6	
71	7,1	136	19,2	

Tabelle II.

Kurve II. Sekundärröhre. Abstand = 22 cm.

V	E_k	$e_s \cdot 10 + 3$	$\frac{e_s}{E_k} \cdot 10 + 3$	Bemerkungen
49	5,5	67,0	12,2	Primärstrom
55	5,0	71,0	14,2	4,9 Ampère
61	4,7	86,0	18,3	
65	4,4	97,0	22,1	
68	4,0	89	22,2	
73	3,5	89	25,5	
76	3,4	84	24,8	
36	7,4	50	6,8	
39	6,2	44	7,1	
45	5,9	48	8,1	
51	6,0	58	9,7	
56	5,2	77	14,8	
60	4,8	81	16,8	
63	4,5	80	17,8	
72	3,7	81	21,8	
79	3,3	81	24,5	
80	3,6	80	22,3	
84	3,2	80	25,0	
48	2,6	32	12,3	3,3 Ampère
51	2,5	34	13,6	
57	2,2	38	17,3	
62	2,1	39	18,6	
65	1,9	39	20,5	
67	1,8	39	21,6	
49	8,2	97	11,8	6,5 Ampère
19	6,0	4,7	0,78	4,9 Ampère
23	6,0	7,0	1,17	
25	6,0	7,1	1,18	
28	5,7	9,2	1,62	
29	5,9	17,5	2,97	
31	5,7	21,6	3,8	
31	6,0	21,7	3,6	
38	5,4	33,0	6,1	
42	5,7	37,0	6,5	
48	4,1	52,0	12,7	
54	4,4	65,0	14.8	
57	4,1	62,0	15,1	

Aus den Kurven sieht man, dass das Verhältnis $\frac{E_r}{E_k}$ unabhängig von der Stärke des Primärstromes ist. Es wächst aber mit der Spannung und zwischen 40 und 70 Kilowatt fast proportional derselben. Ich habe versucht, eine Korrektion wegen der Absorption anzubringen. Da die Röhre schon vernichtet war, habe ich die Absorption in einem Stück Glas aus einer ähnlichen Röhre bei verschiedener Spannung beobachtet und die Kurve IIIa konstruiert. Durch die Werte, welche Wien für die Absorption in der von mir gebrauchten Röntgenröhre sowohl wie in der Sekundärröhre angegeben hat, habe ich die entsprechenden Kurven b und c gezogen. Wenn man dann die Korrektion für die Absorption in beiden Glaswänden an der Kurve II anbringt, so nähert sie sich einer geraden Linie, welche die Abzcissenachse fär den Wert der Spannung, bei dem die Wirkung der Strahlen eben merklich wird, schneidet. Es scheint mir deswegen sehr wahrscheinlich zu sein, dass, wenn man vollständig für die Absorption in der ersten Röhrenwand korrigieren könnte, die Spannungskurve etwa parallel der gezeichneten Geraden durch den Nullpunkt gehen würde. Um das genauer zu beweisen, müsste man die Sekundärplatte in die Röhre selbst oder in einen durch dünnes Aluminium getrennten und höher evakuierten Nebenraum hineinbringen. Dass die Kurve I sich bei der Korrektion für die Absorption in einer Glaswand einer Geraden nicht so genau nähert, rührt davon her, dass die Absorption in der ersten Röhrenwand in Wirklichkeit die in der zweiten stark überwiegt.

Es geht also aus diesem Teil der Versuche hervor, dass das Verhältnis $\frac{E_r}{E_k}$ unabhängig von der Primärstromstärke und proportional der Spannung an der Röhre ist.

Parallel mit den bolometrischen Messungen gingen beständig die Messungen der in der Sekundärröhre erzeugten positiven Elektrizität. Da diese Menge sich durchweg proportional den bolometrischen Ausschlägen erwies, so sind die späteren Messungen, von einzelnen Kontrollmessungen abgesehen, mit der Sekundärröhre gemacht, weil diese Beobachtungen genauer sind und sich auch bei niedrigerer Spannung durchführen lassen als die bolometrischen.

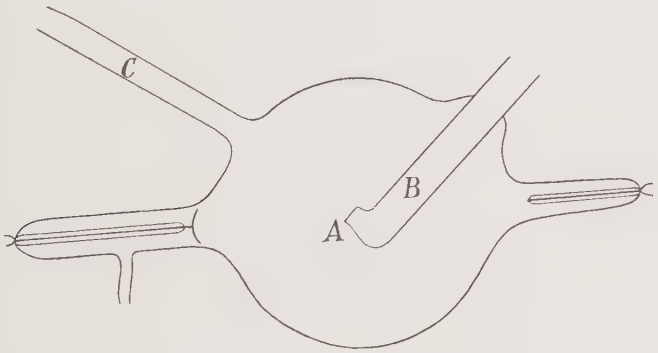
Abhängigkeit von der Natur der Antikathode.

Schon im Jahre 1897 hat Kaufmann[1]) das Emissionsvermögen einiger Metalle für Röntgenstrahlen photographisch untersucht. In einer Röhre, welche eine flache Kathode besass, wurden zwei halbkreisförmige Metallplatten am Ende eines Schliffes als Antikathode benutzt und durch ein Loch in einem Bleischirm wurde die Antikathode auf einer photographischen Platte abgebildet. Obgleich die photographische Wirkung nicht proportional dem Härtegrad der Strahlen ist und es fraglich ist, ob man sie als Mass für die Energie der Röntgenstrahlen annehmen darf, gebe ich hier die Reihe, welche Kaufmann später aufgestellt hat, an:

Al — Fe — [— Ni — Cu — Sn — Zn —] — Ag — [— Cd — Pt — Pb — U].

Bei den in [ ] stehenden Metallen war das Emissionsvermögen nur wenig verschieden. Das Emissionsvermögen scheint danach im allgemeinen mit dem Atomgewicht zu steigen.

Die Röhren, die ich für diese Untersuchungen gebraucht habe, wurden von Kramer in Freiburg i. Br. geliefert und hatten folgende Konstruktion:



„A“ ist eine eingeschmolzene Platinkappe, in welche die Metallscheiben gerade hineinpassten. Die Scheiben waren 1 mm dick und 2 cm im Durchmesser; sie wurden durch „C“ hineingeführt. „B“ diente als Kolorimetergefäss und enthielt bei jedem Versuch 50 ccm Wasser. Der Durchmesser der Röhre betrug 17,5 cm.

Die Antikathode war meistens durch einen Draht, der auch als Rührer diente, mit der Anode verbunden. Manchmal aber war

1) Verh. d. physik. Ges. Berlin 1897, p. 116.

die Entladung ruhiger, wenn die Verbindung nicht benutzt wurde; für die Messungen war dies gleichgültig.

Mit der ersten Röhre dieser Art wurden Beobachtungen mit Aluminium, Kupfer und Nickel gemacht. Als dann Platin hineingetan und die Röhre wieder ausgepumpt wurde, erhielt ich kräftige Funken bei grossen Abständen der Kugel und fast keine Wirkung auf das Elektrometer. Da inzwischen das Induktorium gewechselt wurde und das frühere nicht mehr zur Verfügung stand, habe ich geglaubt, dass die Ursache dieser Störungen irgendwie im Zusammenwirken von Induktorium, Unterbrecher und Röhre lag und ich habe alles Mögliche in der Art und Zahl der Unterbrechungen variiert, aber umsonst. Der Wehnelt-Unterbrecher hat nicht mehr gegeben. Dann habe ich es mit der Influenzmaschine probiert und sie hat mir Werte geliefert, die mit den früheren Werten für Platin bei der Spannungsuntersuchung übereinstimmten. Die Röhre ist bald danach gesprungen, darum habe ich die frühere Platinkurve für den Abstand korrigiert und mit der von Kupfer und Aluminium zusammen aufgetragen. Für Nickel habe ich wenige Beobachtungen gemacht, dieselben lagen auf der Kupferkurve.

Später habe ich gefunden, dass die grossen Funkenlängen irgendwie durch Schwingungen entstanden sind und der Spannung an der Röhre gar nicht entsprachen. Bei diesem Zustand war es manchmal möglich, die Kugeln sehr nahe aneinander zu schieben, bis die Funkenstrecke die Entladung von der Röhre ganz wegnahm. Wenn die Röhre weiter ausgepumpt und die Entladung längere Zeit durchgeschickt wurde, ist die Entladung oft regelmässiger geworden, so dass Spannungsmessungen möglich waren. Wenn dies nicht der Fall war, habe ich die Influenzmaschine benutzt. Ich hätte die Influenzmaschine für alle Messungen verwendet, aber wegen des kleinen Stromes, den sie liefert und den Schwankungen in der Spannung bei dem ungleichmässigen Laufe der Maschine stimmten die Resultate weniger gut miteinander überein als bei dem Induktorium. Immerhin bieten die Versuche mit der Influenzmaschine eine Kontrolle dafür, dass die Unterbrechungsart und die Stromkurve beim Induktionsapparat nur geringen Einfluss auf die Energie der Röntgenstrahlen hat.

Mit einer neuen gleichen Röhre habe ich dann Platin, Kupfer Eisen und Gold untersucht. Den grossen Wert, den Platin diesmal gegeben hat, kann ich nicht erklären. In allen Fällen wurden die Metalle frisch poliert, ehe sie hineingetan wurden. Ein Fleck, wahrscheinlich eine Oxydschicht, hat sich bei jedem Metall, wo das Hauptbündel der Kathodenstrahlen auftraf, gebildet; aber ich konnte keine Verminderung der Wirkung während der Zeit der Beobachtungen konstatieren. Nur bei der allerersten Röhre, nach sehr langem Gebrauch und nachdem oft Luft hineingelassen wurde und der Fleck sich tief in das Platin hineingefressen hatte und ganz schwarz aussah, habe ich eine allmähliche Verminderung in der Wirkung beobachtet.

Die Goldkurve liegt an der Stelle der früheren Platinkurve. Die Goldantikathode bestand aus einer vergoldeten Kupferscheibe.

Der Einfallswinkel bei der letzten Röhre war 50^0 gegen 60^0 bei den anderen.

Die Absorption bei dieser Röhre könnte kleiner gewesen sein, aber der Unterschied würde lange nicht den hohen Wert für Platin erklären. Die Resultate sind folgende:

Tabelle III.

Kurven V. Sekundärröhre-Abstand = 15,6 cm.

Metall	V	E_k	$e_s \cdot 10+3$	$\frac{e_s}{E_k} \cdot 10^3$	Stromquelle
	48	1,46	56,7	38,8	Induktorium. Turbinen - Unterbrecher, 32 Unterbrechungen pro Sekunde
	55	1,43	68	47,5	
	56	1,43	67	47,0	
	50	1,53	62	40,5	
	56	1,44	68	47,2	
	59	1,26	75	59,5	
	64	1,03	62	60,0	
	61	1,20	63	52,5	
	59	1,24	74	59,7	
	65	2,33	129	55,5	
	47	1,31	45	34,3	Desgleichen. 41 Unterbrechungen pro Sekunde
	48	1,80	66	36,5	
	53	1,68	72	43,0	
	62	1,45	88	60,5	

Metall	V	E_k	$e_s \cdot 10^3$	$\frac{e_s}{E_k} \cdot 10^3$	Stromquelle
Platin	48	1,57	57	36,4	Desgleichen. 22 Unterbrechungen pro Sekunde
	54	1,82	89	46,3	
	58	2,05	90	44,0	
	59	1,77	95	53,7	
	64	1,54	104	67,2	
	38	1,59	42	26,4	Influenzmaschine
	39	1,70	49	28,8	
	45	1,50	55	36,6	
	48	1,20	41	34,3	
	51	0,76	30	39,5	
	56	1,26	62	49,2	
	61	1,32	61	46,2	
	48	0,89	19	21,4	
	48	0,94	34	36 2	Induktorium. 96 Unterbrechungen pro Sekunde
	49	0,69	25	36,2	
	64	1,53	46,0	30,6	
	46	0,34	10,3	31,2	Desgleichen. 128 Unterbrechungen pro Sekunde
	64	0,69	13,7	19,8	
Kupfer	51	1,62	10,2	6,3	Influenzmaschine
	51	1,74	10,6	6,1	
	54	1,32	8,5	6,5	
	56	1,62	10,8	6,7	
	58	1,62	13,6	8,4	
	63	1,86	18,0	9,7	
	64	1,68	16,3	9,7	
Eisen	45	2,46	25,6	10,4	Induktorium. 32 Unterbrechungen
	47	2,34	23,3	10,0	
	50	2,40	26,0	10,8	
	54	2,46	28,0	12,4	
	54	2,22	27,5	12,4	
	58	2,16	29,2	13,5	
	58	2,58	33,6	13,0	
	59	2,40	35,3	14.7	
	62	1,74	28,0	16,1	

Metall	V	E_k	$e_s \cdot 10_3$	$\frac{e_s}{E_k} \cdot 10_3$	Stromquelle
Gold	42	2,04	29,0	14.2	Induktorium. 32 Unterbrechungen
	43	2,52	37,8	15,0	
	51	2,28	52,5	23,0	
	52	2,16	47,5	22,0	
	46	2,40	45,5	19,0	
	48	2,40	46,5	19,4	
	48	2,40	48,0	20,0	
	43	3,36	45,1	13,4	Induktorium. Wehnelt-Unterbrecher
	37	3,60	38,5	10,7	
	37	3.66	39,0	10,7	
	47	4,62	85,7	18,2	
	49	4,92	95,0	19,3	
	54	4,44	100,0	22,5	
	52	4,15	85,0	20,5	

Die Kurven stellen das Verhältnis des Emissionsvermögens bei verschiedenen Metallen nicht quantitativ dar, weil die Absorption der Strahlen in der Röhrenwand sehr verschieden ist. Ich habe die Absorption der von Gold emittierten Strahlen mit der von Eisen ausgesandter Strahlen verglichen. Die Werte für Gold stimmten mit der Kurve III „a" überein, aber Eisen hat die Absorptionskurve III „d" gegeben. Aus den Kurven kann man folgendes sehen: Während für dieselbe Spannung die Absorption der von Eisen ausgesandten Strahlen grösser ist, so findet man, wenn man die Absorption für denselben Wert von $\frac{E_r}{E_k}$ vergleicht, dass sie identisch ist.

Wie ich aus meinen Resultaten schliesse, ist das Emissionsvermögen im allgemeinen zwar grösser bei Metallen von höherem Atomgewicht, doch ist es weder dem Atomgewicht noch der Dichte proportional. Die Abweichungen müssen entweder durch andere spezifische Eigenschaften der Metalle oder durch eigentümliche Zustandsänderungen in der Entladung bei sukkzessivem Auspumpen der Röhre erklärt werden.

Abhängigkeit von der Art und Zahl der Unterbrechungen.

Die Frage lag immer nahe, ob die Unterbrechungszahl oder -Art das Verhältnis $\frac{E_r}{E_k}$ beeinflusst. Dies wurde in sehr verschiedener Weise ausprobiert. Die Beobachtungen mit Platin [Tab. III Pt] wurden teilweise mit 22, 32 und 41 Unterbrechungen gemacht, aber die entsprechenden Werte für $\frac{E_r}{E_k}$ liegen alle auf derselben Spannungskurve innerhalb der Versuchsfehler. Die Unterbrechungszahl wurde dann gesteigert. Bei 96 pro Sekunde stimmten die Resultate immer noch bei kleiner Spannung, auch sogar bei 128 Unterbrechungen, aber bei 180 Unterbrechungen pro Sekunde waren die Werte bei jeder Spannung innerhalb der gewöhnlich gebrauchten Bereiche kleiner. Die Funken haben bei dieser hohen Unterbrechungszahl den Charakter eines Flammebogens und es war nicht sicher, ob sie die wirkliche Spannung an der Röhre massen.

Mit Gold habe ich zum Teil mit dem Wehnelt- und zum Teil mit dem Turbinenunterbrecher gearbeitet, aber die Werte für $\frac{E_r}{E_k}$ sind wieder auf dieselbe Spannungskurve gefallen. Mit einer Röhre, die so dünnwandig war, dass sie bei den Versuchen gesprungen ist, habe ich abwechselnd mit dem Turbinenunterbrecher und mit einem Hammerunterbrecher und anderem Induktorium eine Reihe von Beobachtungen mit Platin gemacht, die untereinander sehr gut übereinstimmten. (Die Spannungskurve war in diesem Fall wegen der dünnen Wand viel weniger gekrümmt.)

Mit der Funkenstrecke misst man die maximale Spannung, und da die Strahlen nur bei der maximalen Spannung emittiert werden, scheint es innerhalb sehr weiter Grenzen gleichgültig zu sein, wie die Gestalt der Spannungskurve ist. Man könnte sich zunächst denken, dass die Stärke der Krümmung in der Spannungskurve die Energiemenge der emittierten Strahlen beeinflussen würde, aber die Kathodenstrahlenenergie und die Röntgenstrahlenenergie scheinen immer in gleicher Weise geändert zu werden.

Aus diesen Versuchen schliesse ich dann, dass das Verhältnis der Energie der Röntgenstrahlen zu der Energie der erzeugenden

Kathodenstrahlen im allgemeinen unabhängig von der Art und jedenfalls innerhalb sehr weiter Grenzen von der Zahl der Unterbrechungen ist.

Während das Verhältnis $\frac{E_r}{E_k}$ unabhängig von der Unterbrechungszahl ist, ist das bei dem absoluten Wert von E_r nicht der Fall. Aber es zeigt sich, dass E_r keineswegs proportional der Unterbrechungszahl ist. Man findet kleinere Werte für E_r, wenn man die Unterbrechungszahl vermehrt, weil infolge der grösseren Selbstinduktion der Primärstrom zurückgeht. In diesem Falle habe ich daher eine höhere Spannung an der Primärspule gebraucht.

Aus dem angeführten Grunde ist es auch unzulässig, den Wert von E_r auf eine Unterbrechung pro Sekunde zu reduzieren.

Absoluter Wert der Röntgenstrahlenenergie.

Bis wir die Eigenschaften der Sekundärstrahlen näher kennen, ist es unmöglich aus den Beobachtungen mit der Sekundärröhre die Energie der Röntgenstrahlen in absoluten Einheiten auszuwerten. Es war mir jedoch von Interesse, unter der Voraussetzung, dass die Wärmewirkung massgebend ist für die Energie der Strahlen, den absoluten Wert aus den Bolometerbeobachtungen zu berechnen.

Zu diesem Zwecke habe ich das Bolometer mit der Strahlung eines auf 100° erhitzten schwarzen Körpers [1]) geeicht. Die strahlende Fläche betrug 7,9 qcm und befand sich in einem Abstand von 67 cm. Die Bolometerfläche betrug 227 qcm. Bei einer Empfindlichkeit des Galvanometers von $56{,}4 \cdot 10^{-9}$ [2]) bekam ich einen Ausschlag von 59 Skalenteilen.

Es ergab sich dann nach dem Stefanschen Gesetz, dass ein Ausschlag von 1 Sk.-T. bei der von mir benutzten Empfindlichkeit einer durch die Röhre hindurchgehenden Energiemenge von $2{,}4 \cdot 10^{-5}$ g Kal. entsprechen müsste. Dabei habe ich gerechnet, dass nur 76% von dem Bolometer absorbiert werden. Durch

1) Wien, W. u. Lummer, O., Wied. Ann. 56. p. 451. 1895.

2) Durch einen Verschaltwiderstand wurde die Empfindlichkeit des Galvanometers reduziert ohne die Schwingungsdauer und dadurch die Zeit der Bestrahlung zu ändern.

Multiplikation dieses Faktors mit dem Ausschlag „D" in der Tabelle erhält man die über die Halbkugel durch die Röhre gestrahlte Energiemenge und kann daraus das Verhältnis $\frac{E_r}{E_k}$ berechnen.

Ich habe der Rechnung die Beobachtung 17 auf Tab. I zugrunde gelegt. Bei der Spannung 59 Kilovolt war der Ausschlag = 62 Sk.-T. als $E_k = 4{,}8$ g Kal. pro Sekunde war. Wenn man annimmt, dass 42 % in der Röhrenwand absorbiert werden, und dass ebensoviel Röntgenstrahlenenergie in die Antikathode hineingeht wie herauskommt, erhält man für die gesamte Energie der Röntgenstrahlen in diesem Fall

$$E_r = 5{,}14 \text{ g} \cdot 10^{-3} \text{ Kal. pro Sekunde.}$$

Daraus berechnet sich:

$$\frac{E_r}{E_k} = 1{,}07 \cdot 10^{-3}.$$

Der Wiensche Wert für diese Spannung ist

$$\frac{E_r}{E_k} = 2{,}18 \cdot 10^{-3}.$$

Zusammenfassung der Resultate.

Da die Energie der Röntgenstrahlen direkt abhängig von der Energie der Kathodenstrahlen ist, so wurde bei allen Versuchen das Verhältnis $\frac{E_r}{E_k}$ gemessen. Die Abhängigkeit dieses Verhältnisses von verschiedenen Anordnungen wurde mit folgendem Resultat untersucht.

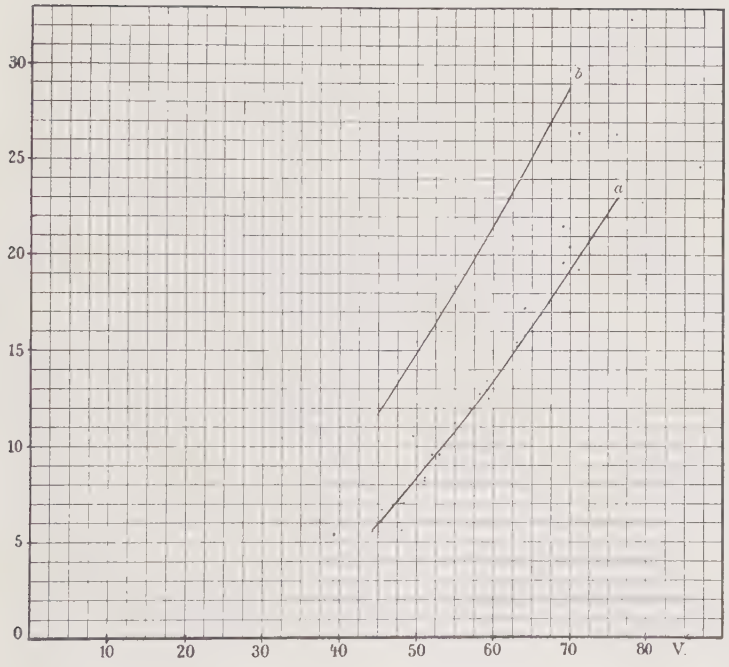
$\frac{E_r}{E_k}$ hängt bei Verwendung des Induktoriums nicht von der Primärstromstärke ab.

$\frac{E_r}{E_k}$ ist direkt proportional der Spannung an der Röhre.

$\frac{E_r}{E_k}$ ist unabhängig von der Art und Zahl der Unterbrechungen und gibt auch denselben Wert bei Benützung der Influenzmaschine.

$\frac{E_r}{E_k}$ ist im allgemeinen grösser bei Metallen von höherem Atomgewicht.

Kurve I. Bolometer.

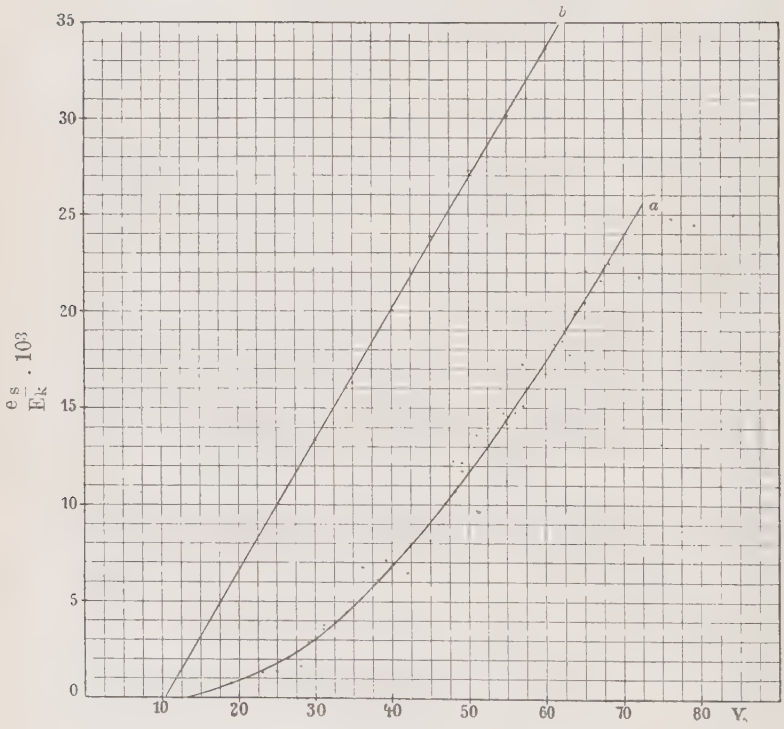


Spannung in Kilovolt.

a = ohne Berücksichtigung der Absorption

b = mit „ „ „

Kurve II. Sekundärröhre.

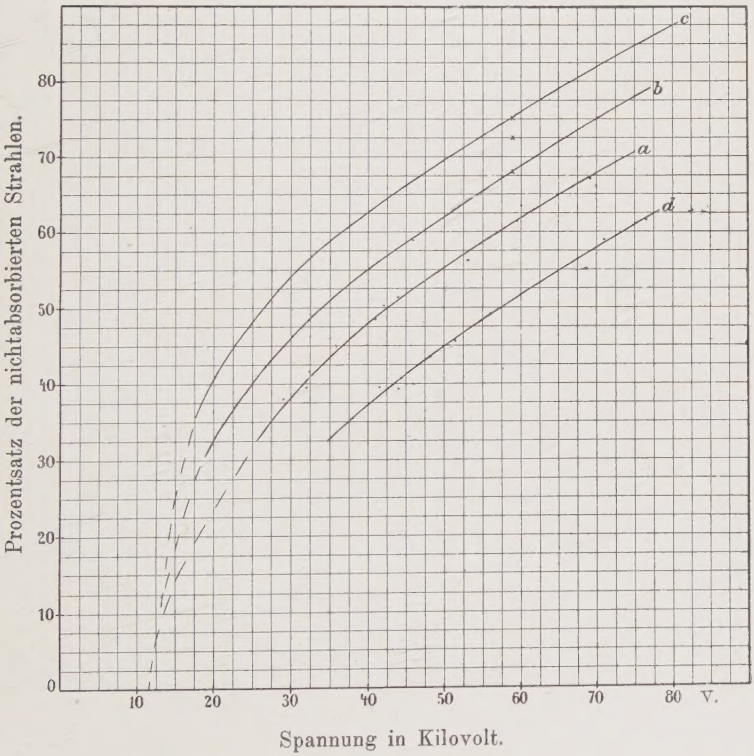


Spannung in Kilovolt.

a = ohne Berücksichtigung der Absorption

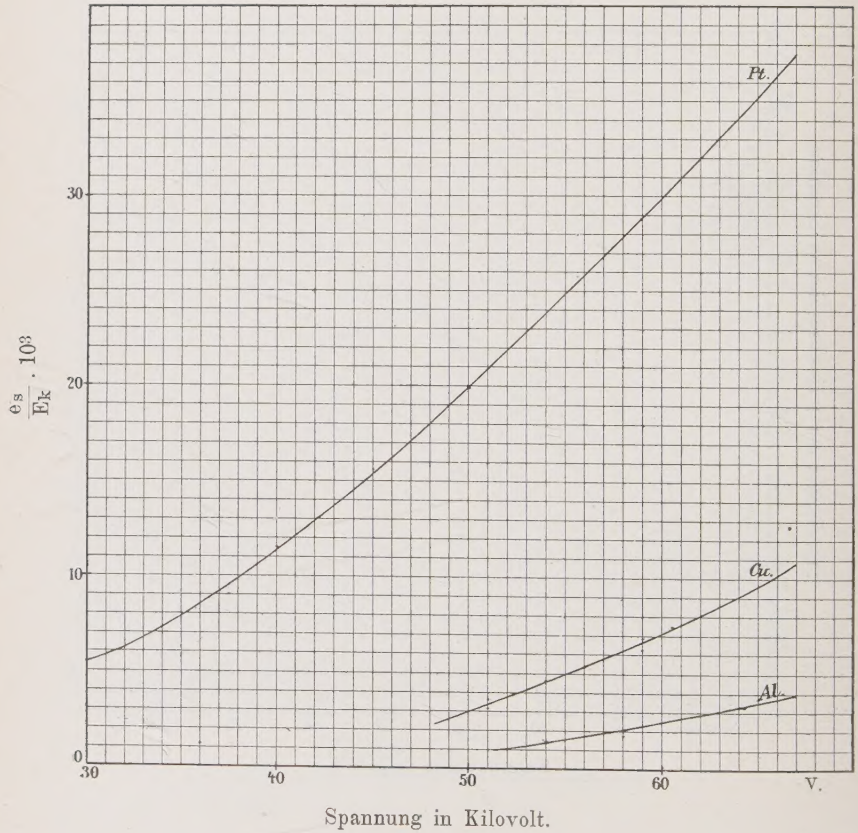
b = mit „ „ „

Kurven III. Absorption.



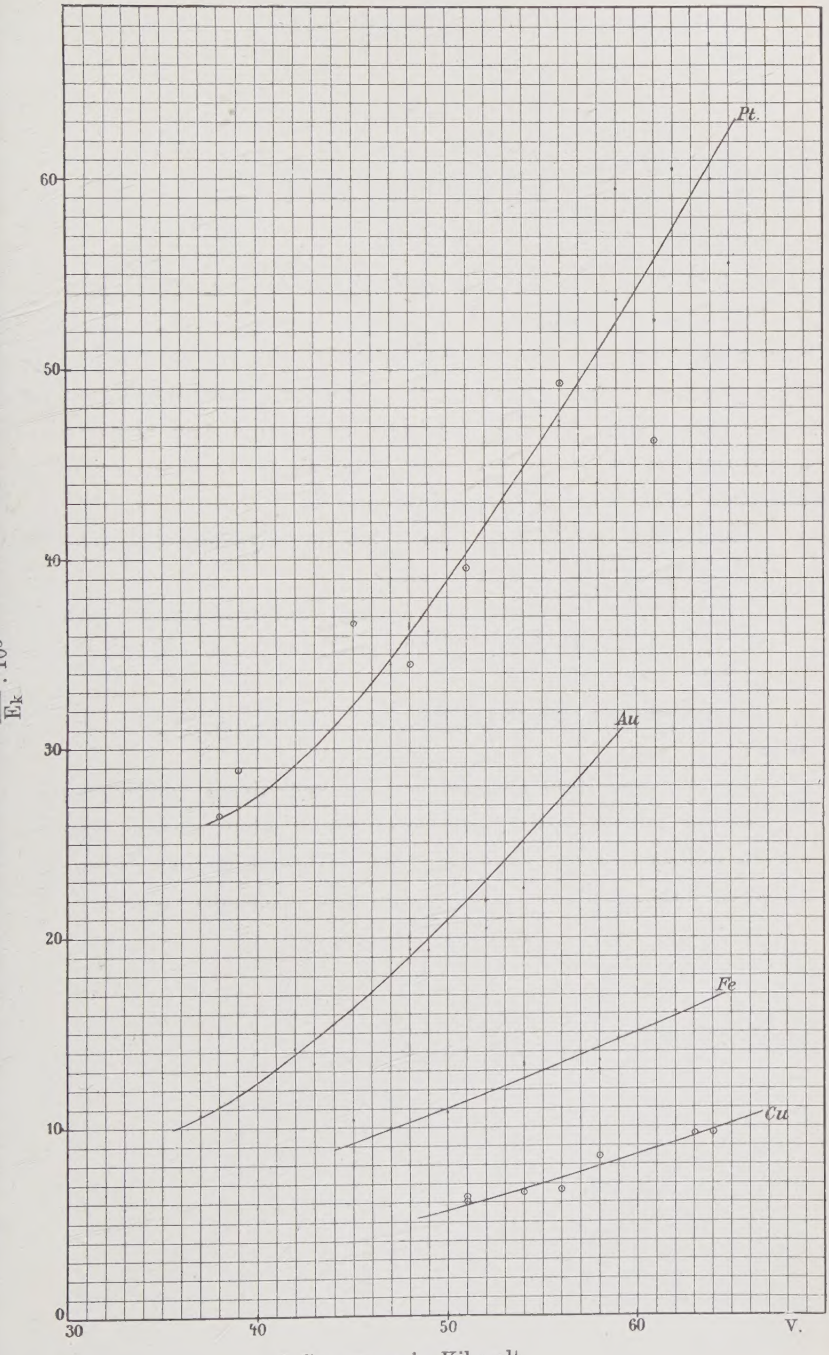
Kurven IV. Antikathoden [Pt., Cu., Al.].

Abstand 16 cm.



Spannung in Kilovolt.

Kurven V. Antikathoden [Pt., Au., Fe., Cu.].



Lebenslauf.

Ich, Edna Carter, bin zu Oshkosh, Wisconsin, U. S. A. als Tochter des Gutsbesitzers Benj. J. Carter und seiner Gemahlin Louisa geb. Runnels am 29. Januar 1875 geboren und protestantisch erzogen. Nach Besuch der dortigen städtischen Schulen studierte ich vier Jahre im Vassar College und drei Semester an der Universität Chicago, war auch zwei Jahre Assistent im physikalischen Praktikum im Vassar College.

Die letzten vier Semester habe ich im physikalischen Institute zu Würzburg praktisch gearbeitet.

Ich habe die Vorlesungen folgender Herren Dozenten besucht:

In Chicago: Bolza, Mann, Maschke, Michelson, Millikin, Stratton.

In Würzburg: Boveri, Cantor, Harms, Prym, Seitz, Wien.

Am 24. Juli 1906 bestand ich die mündliche Doktorprüfung.

Es sei mir gestattet, an dieser Stelle allen meinen hochverehrten Lehrern, deren Unterricht ich während meiner Studienzeit genossen habe, meinen herzlichsten Dank auszusprechen.